

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА В РАМКАХ
ОБОБЩЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ АЛЕКСЕЕВА-БОЛЬЦМАНА

Д.М. Калицев

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Хорошо известно [1], что основные методики моделирования движения вязких неизотермических систем (инертных и реагирующих смесей) базируются на моделях сплошной среды, основанных на формулировках законов сохранения массы, импульса, энергии с соответствующими замыканиями для тензора поверхностных сил, потоков скалярной субстанции (тепла и массы), которые дают прогноз деталей процессов во многих практически важных технологических устройствах [2-5]. Так, изучение природы турбулентного режима течения жидкости и газа в малых масштабах долгое время было связано с решением уравнений Навье-Стокса при больших значениях числа Рейнольдса (Re). В случае, когда значение Re превышает некоторое критическое значение вследствие неустойчивости потока, образующаяся нерегулярность и хаотичность течения создает необходимость введения дополнительных предположений (например, усреднения по времени, ансамблю и т.д.), что заставляет обращаться к замыканиям более высокого порядка по цепочке уравнений Фридриха-Келлера для описания турбулентных течений [4]. Требование более точного, подробного описания турбулентных течений создает необходимость более глубокого понимания физического механизма процессов, которые происходят в данных течениях. Известно, что уравнения Навье-Стокса не показывают деталей влияния изменений флуктуаций, при учете которых кардинально изменяется ситуация (см., например, [2,4-8]) и, согласно Б. В. Алексееву «...теория турбулентности, основанная на уравнениях Навье-Стокса, зашла в тупик [2]».

Целью работы является критический анализ библиографических данных по перспективам гидродинамического моделирования течений в рамках идей молекулярно-кинетического подхода и кинетических уравнений, учитывающих развитие функции распределения элементарных частиц. Такой подход представляется оригинальным, является более совершенным и универсальным, так как позволяет моделировать течения в обширном диапазоне изменения чисел Рейнольдса, и учитывает пространственно-временную эволюцию флуктуаций поля скорости. Заметим, что подобные уравнения получены на основе уравнений Больцмана [2-2,7,9]. Так, основное уравнение физической кинетики для одночастичной функции распределения было сформулировано Больцманом и имеет вид

$$\frac{Df}{Dt} = J^{st}(f) \quad (1)$$

где J^{st} – интеграл столкновений, D/Dt – субстанциональная производная. Уравнение (1) играет важную роль в физике, особенно в гидродинамике. Заметим, что с момента формулировки и до настоящего времени, оно критикуется из-за существующих противоречий (см. например, [3,9]):

Уравнение Больцмана используется для масштаба времени между столкновениями частиц и гидродинамическим течением, но оно не предназначено для времени взаимодействия, которое происходит при столкновении частиц. В результате чего, определенные физические явления, в которых существенен масштаб времени взаимодействия сталкивающихся частиц, выпадают из рассмотрения.

Как правило, одиночная частица функции распределения, входящая в уравнение (1), нормируется на количество частиц в единице объема. Такая нормировка вероятна, если частицы учитывать, как материальные точки. Однако, при определении интеграла столкновений, требуется рассматривать частицы конечного размера. Нахождение центра масс элемента в контрольном объеме не означает, что она вся находится в этой ограниченной области. В любой момент времени найдутся частицы, находящиеся частично внутри, а частично снаружи контрольной поверхности, в связи с этим возникают флуктуации массы, а значит и других гидродинамических величин [9].

Рассмотренных противоречий достаточно, чтобы подтвердить необходимость вывода более общего уравнения, чем уравнение (1), которое бы не включало указанные проблемы и несоответствия. Одна из попыток создания обобщенного уравнения Больцмана удалось Б. В. Алексееву с формулировкой обобщенных гидродинамических уравнений. Вывод обобщенного уравнения Больцмана представлен в работах [2,7]. Исходя из результатов этих работ, имеем кинетическое уравнение на основе иерархии уравнений Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона (ББГКИ)

$$\frac{Df}{Dt} = J^{st} + J^{td} \quad (2)$$

где J^{td} – нелокальный интегральный член с учетом эффекта запаздывания [2,3,7,9]:

$$J^{td} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\tau \frac{Df}{Dt} \right) \quad (3)$$

В этом случае (2) примет вид

$$\frac{Df}{Dt} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\tau \frac{Df}{Dt} \right) = J^{st} \quad (4)$$

f – функция распределения.

Обобщенное уравнение Больцмана с позиции теории флуктуации имеет вид [9]

$$\frac{Df^a}{Dt} = J^{st}, \quad (5)$$

$$f^a = f - \tau \frac{Df}{Dt}. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) обладают правильным свободномолекулярным пределом. Здесь f^a является флуктуацией функции распределения.

**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ
И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

Анализ показывает, что молекулярно-кинетический метод с учетом нелокальных эффектов однозначно ведет к флуктуационным процессам, которые пропорциональны среднему времени между столкновениями для газа и времени пребывания частицы в «клетке» – жидкости [3]. Флуктуации имеют место в любой открытой системе, ограниченной прозрачной для частиц контрольной поверхностью [2,4].

Обобщенное уравнение Больцмана с учетом (4) можно представить

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(f - \tau \frac{\partial f}{\partial t} \right) = J^{\text{st}}(f). \quad (7)$$

Видно, что форма (7) приводит к возможности анализа процессов в рамках уравнений неразрывности, движения и энергии, а также становится возможным при использовании молекулярно-кинетической теории сплошных сред учитывать три группы масштабов [3,7]: 1. Клеточный масштаб, соответствующий колебаниям молекулы в «запертом» состоянии, а именно: v_{0k} – масштаб скорости колебательного движения частицы в «запертом» состоянии; g_k – масштаб размера клетки, где V_k – объем клетки, τ_0 – период колебания частицы в клетке. Будем называть эту группу масштабов – « τ_0 -масштаб»; 2. Масштаб клеточного состояния, связанного с характерным временем пребывания частицы в клетке или « τ -масштаб»: $v_{0\tau}$ – масштаб скорости частицы в « τ -масштабе» (этот масштаб скорости не совпадает с v_{0k} , поскольку частица, обладающая высокой энергией, в состоянии преодолеть энергетический барьер, связанный с энергией активации); r_τ – масштаб длины в τ -масштабе (характерное расстояние, которое проходит частица за время пребывания в клетке); τ – время пребывания частицы в клетке; 3. Гидродинамический масштаб, не нуждающийся в дополнительных пояснениях: v_L – гидродинамическая скорость течения; L – гидродинамическая длина; τ_L – гидродинамическое время.

На основе трудов Больцмана [10,11] и учета трех групп масштабов, были сформулированы обобщенные уравнения гидродинамики (ОУГ), которые можно считать усовершенствованным вариантом фундаментальных уравнений гидродинамики [6].

Анализ позволяет отметить, что обобщенные гидродинамические уравнения являются более современными и актуальными для моделирования гидродинамических процессов, по сравнению с уравнениями Навье-Стокса. На базе работ Больцмана создаются программы математического моделирования, а также из них вытекает множество других подходов описания ламинарных и турбулентных течений. Развитие методов ветвления результатов кинетических уравнений позволит в дальнейшем дать полноценную картину всех спектральных областей турбулентных течений довольно широкого генезиса.

Обобщенные гидродинамические уравнения учитывают в спектре пульсаций колмогоровские флуктуации и позволяют моделировать течения в широком диапазоне чисел Рейнольдса, поэтому их использование для описания турбулентного процесса более целесообразно. Помимо этого, новые уравнения применяют для решения задач в таких областях, как астрофизика, физика атмосферы (развитии общей теории и моделировании) и т. д. (см., например, [12,13]). В нефтегазовых приложениях, в которых рассматриваемый метод еще не использовался, необходимо проведение исследования по изучению опыта применения ОУГ для дополнительного анализа явлений. Все это представляет предмет перспективных будущих задач. Их решение поспособствует дальнейшему развитию отрасли, оптимизации энергозатрат (например, в транспортировке УВ сырья), использованию усовершенствованных технологий.

Литература

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 5-е изд., испр. – М.: Изд-во «Дрофа», 1978. – 736 с.
2. Алексеев, Б. В. Физические основы обобщенной больцмановской кинетической теории газов / Б. В. Алексеев // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 6. – С. 649–679.
3. Алексеев, Б. В. К кинетической и гидродинамической теории жидкостей / Б. В. Алексеев // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, № 2. – С. 215–222.
4. Алексеев, Б. В. Нелокальная физическая кинетика / Б. В. Алексеев // Вестник Томского государственного университета. – 2008. – № 3. – С. 53–58.
5. Белоцерковский, О. М. Применение уравнения Каца к моделированию турбулентности / О. М. Белоцерковский, Н. Н. Фимин, В. М. Чечёткин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2010. – Т. 50, № 3. – С. 575–584.
6. Chen, H. Recovery of full rotational invariance in lattice Boltzmann formulations for high Knudsen number flows / H. Chen, R. Zhang, I. Staroselsky, M. Jhon // Physica A. – 2006. – 362:125–131.
7. Alexeev, B.V. Generalized Boltzmann Physical Kinetics. Elsevier. –2004.
8. Белоцерковский, О. М. Когерентные структуры в гидродинамике и кинетические уравнения / О. М. Белоцерковский, Н. Н. Фимин, В. М. Чечёткин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2010. – Т. 50, № 9. – С. 1613–1623.
9. Алексеев, Б. В. Граничные условия в теории обобщенных гидродинамических уравнений / Б. В. Алексеев // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т. 42, № 4. – С. 551–562.
10. Boltzmann, L. Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. – Sitz. Ber. Kaiserl. Akad. Wiss. – 1872. – 66 (2). – P. 275–370.
11. Черчиньяни, К. Теория и приложения уравнения Больцмана. – М.: Мир. – 1978. – 495 с.
12. Alexeev B.V. ArXiv, 1012.5286 (physics. gen-ph): Problems of antimatter after Big Bang, dark energy and dark matter. Solutions in the frame of non-local physics (2010).
13. Соловчук, М.А. Уравнения обобщенной гидродинамики в кинетической теории и распространение акустических волн в разреженном газе [Текст]: дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (01.04.02) / Соловчук Максим Александрович; РГУ им. И. Канта. – Калининград, 2007. – 89 с.